



Satelliten-Tracking mit VLBI – Hintergründe und praktische Umsetzung

Satellite tracking with VLBI – background and practical implementation

Andreas Hellerschmied, Wien

Kurzfassung

Beobachtungen künstlicher Satellitensignale mit dem Verfahren der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) bieten vielversprechende Möglichkeiten zur Verknüpfung geodätischer Weltraum-Verfahren und haben somit das Potential, wesentlich zur Verbesserung globaler Referenzrahmen beizutragen. Basierend auf neu entwickelten Beobachtungs- und Analyse-Prozessen wurde im November 2016 der chinesische APOD-A nano über mehrere Tage hinweg vom australischen AuScope VLBI Netzwerk getrackt. Diese Fallstudie zeigt erstmals erfolgreiche VLBI Beobachtungen eines Low Earth Orbit (LEO) Satelliten mit der geodätischen VLBI und bietet eine wichtige Grundlage für weitere Forschung und Entwicklung. Neben einer Diskussion der wichtigsten Grundlagen und Motivationen zum Satelliten-Tracking mit VLBI, gibt dieser Beitrag einen Überblick zur APOD Experiment-Serie: von der Planung bis hin zur Daten-Analyse.

Schlüsselwörter: VLBI, Satelliten-Tracking, Kollokation im Weltraum, ITRS, GGRF, APOD, AuScope

Abstract

Observing artificial satellite signals with Very Long Baseline Interferometry (VLBI) promises possibilities to establish inter-technique ties between space-geodetic techniques and, thus, has the potential to improve future reference frame products. Using newly developed observation and analysis processes the Chinese APOD-A nano satellite was tracked by the AuScope VLBI array over multiple passes in November 2016. For the first time this case study showed successful VLBI observations of a satellite in a low earth orbit, laying the groundwork for further research and development. Besides discussing the most important fundamentals regarding satellite tracking with VLBI and motivations for its implementation, this paper gives an overview of the APOD experiments: from scheduling to data analysis.

Keywords: VLBI, satellite tracking, co-location in space, frame ties, ITRS, GGRF, APOD, AuScope

1. Einleitung

Globale geodätische Referenzrahmen (Global Geodetic Reference Frames, GGRF) bilden die Grundlage für eine Vielzahl an Anwendungen, die gesellschaftlich, wissenschaftlich und wirtschaftlich von hoher Bedeutung sind. Beispielhaft seien hier die Bereiche Positionierung und Navigation, sowie die Erforschung und Quantifizierung geodynamischer Effekte und des Klimawandels genannt. Die Wichtigkeit solch globaler Referenzsysteme wurde 2015 von der Vollversammlung der Vereinten Nationen (UN) mit der Verabschiedung der Resolution „A Global Geodetic Reference Frame for Substantial Development“¹⁾ hervorgehoben und spiegelt sich auch in den Zielen von GGOS, des globalen geodätischen Beobachtungssystem der International Association of Geodesy (IAG), wider. Angestrebt wird die Realisierung eines globalen terrestrischen Bezugsrahmen mit einer Genauigkeit von 1 mm und einer Stabilität von 0.1 mm/Jahr [14]. Dieses ambitionierte Ziel kann nur durch eine rigorose Kombination und Integration der

verschiedenen Boden- und Weltraum-gestützten geodätischen Verfahren erreicht werden [17].

ITRF

Die derzeit genaueste Realisierung eines solchen weltumspannenden Referenzsystems ist der aktuelle International Terrestrial Reference Frame (ITRF2014 [3]). Entsprechend den GGOS Grundsätzen ist der ITRF2014 ein Kombinationsprodukt, basierend auf der gesamten Beobachtungshistorie der vier geodätischen Weltraumverfahren: Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR), Global Navigation Satellite Systems (GNSS) und Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS). Um die Beobachtungen der unterschiedlichen Verfahren in der ITRF Kombination miteinander zu verknüpfen ist eine weitere Eingangsgröße von essentieller Bedeutung: die sogenannten *local ties*. Local ties sind terrestrische, zumeist mittels Totalstation bestimmte, Koordinatendifferenzen zwischen den Referenzpunkten benachbarter Weltraum-geodätischer Instrumente. Diese befinden sich typischerweise in Distanzen von wenigen

1) <https://undocs.org/A/RES/69/266>

hundert Metern an geodätischen Fundamentalstationen, wie am geodätischen Observatorium Wettzell (siehe Abb. 1).

Vergleicht man die terrestrisch bestimmten local ties mit den entsprechenden Koordinatendifferenzen, die sich aus den Beobachtungen der geodätischen Weltraumverfahren ergeben, so findet man signifikante Diskrepanzen [19] [21] [2]. Die ITRF2014 Kombination zeigte beispielsweise, dass 50 % aller SLR-VLBI local ties Diskrepanzen größer als 5 mm, und 30 % größer als 10 mm, aufweisen [3]. Um Produkte wie den ITRF weiter zu verbessern, müssen die Ursachen dieser Diskrepanzen eindeutig bestimmt werden. Dafür wäre eine alternative und unabhängige Methode zur Verknüpfung der verschiedenen geodätischen Verfahren zweckmäßig.



Abb. 1: Local ties (rote Pfeile) verknüpfen die Referenzpunkte geodätischer Instrumente auf Deutschlands Fundamentalstation in Wettzell

Kollokation im Weltraum

Komplementär und unabhängig zu den local ties lassen sich geodätische Weltraum-Verfahren über einen Satellit im Erdorbit verknüpfen. Dieser Ansatz ist schematisch in Abb. 2 dargestellt: Ein Kollokations-Satellit ist mit Instrumenten ausgestattet, die Beobachtungen mit verschiedenen geodätischen Verfahren (SLR, VLBI, GNSS, DORIS) ermöglichen. Sind die relativen Positionen der Instrumente am Satellit genau kalibriert, so können die Beobachtungen der Verfahren geometrisch miteinander in Bezug gebracht werden, u. a. mittels gemeinsam bestimmter Orbit-Parameter. Der Satellit dient somit als gemeinsames Beobachtungsziel und realisiert – bildlich dargestellt – einen bewegten Identpunkt am Himmel, der es erlaubt, die beteiligten Verfahren zu verknüpfen.

Regelmäßige Beobachtungen eines Kollokations-Satelliten bieten nicht nur Möglichkeiten, Diskrepanzen in den local ties und systematische

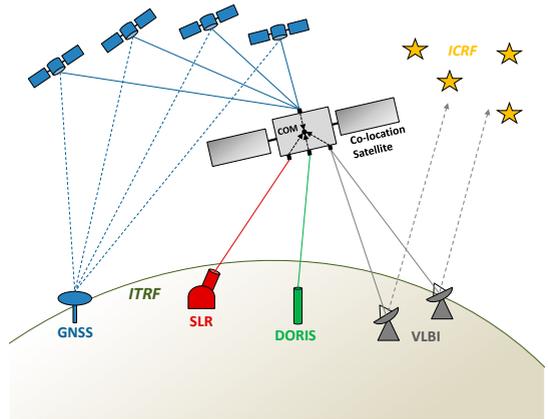


Abb. 2: Ein Kollokations-Satellit dient als gemeinsames Beobachtungsziel, um die beteiligten Verfahren zu verknüpfen [9]

Differenzen in den beteiligten Verfahren aufzudecken. Sie haben ganz generell das Potential die Konsistenz des ITRF zu verbessern, da weit mehr Beobachtungen zur Verknüpfung der Verfahren beitragen [4].

Beobachtung von Satelliten mit VLBI

Während Satelliten-Beobachtungen mit GNSS, SLR und DORIS operationell durchgeführt werden (z. B. zur Orbit-Bestimmung), sind Beobachtungen mit VLBI nicht etabliert und aktueller Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Nach einer Reihe von Simulations-Studien (z. B. [4] [15]), die das Potential, aber auch die Einschränkungen, von VLBI Satelliten-Beobachtungen in Bezug auf die Kollokation im Weltraum zeigten, wurden erste praktische Beobachtungs-Experimente ab 2014 durchgeführt (z. B. [8], [22]). Nichtsdestotrotz standen die nötigen Beobachtungs- und Datenanalyse-Prozesse nicht zur Verfügung, um aus diesen Experimenten Beobachtungsdaten abzuleiten, die als Grundlage für eine geodätische Analyse geeignet wären.

Mit dieser Ausgangssituation initiierte die TU Wien in Kooperation mit der University of Tasmania (Australien) ein Forschungsprojekt, mit dem Ziel, eine vollständige Prozesskette zur einfachen Durchführung von VLBI Satelliten-Beobachtungen zu entwickeln.

2015 gelang es erstmals, sämtliche Prozesse – von der Beobachtungsplanung, bis hin zur Datenanalyse – umzusetzen und, basierend darauf, eine Experiment-Serie mit VLBI-Beobachtungen von GNSS Satelliten²⁾ erfolgreich durchzuführen [16].

2) Beobachtung von GNSS L-Band Signalen auf der Basislinie Hobart-Ceduna (Australien).

2016 konnten die bisherigen Entwicklungen herangezogen werden, um den ersten Prototyp eines Kollokations-Satelliten, den chinesischen APOD-A nano Satellit, mit dem australischen AuScope VLBI Netzwerk zu tracken [11]. Kapitel 4 gibt einen Überblick zu dieser Fallstudie.

2. Geodätische VLBI

Die geodätische VLBI spielt eine Schlüsselrolle bei der Realisierung terrestrischer (TRF) und himmelfester (CRF) Referenz-Rahmen, sowie zur Bestimmung der Erdorientierungs-Parameter (EOP). Das Messprinzip ist in Abb. 3 skizziert: Die Signale extra-galaktischer Radioquellen (zumeist Quasare) werden an mindestens zwei Stationen mit Radio-Antennen (etwa 10 bis 30 m Durchmesser) empfangen, digitalisiert und mit präzisen Atomuhren Zeit-referenziert. Durch Kreuzkorrelation der digitalen Datenströme zweier Stationen wird die Differenz der Signal-Ankunftszeiten als primäre Beobachtungsgröße (*delay* τ) bestimmt. Da ein solcher *delay* τ als Skalarprodukt aus Basislinien-Vektor \vec{b} und Quell-Vektor \vec{s}_0 (dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit) dargestellt werden kann, eignen sich VLBI-Messungen zur Bestimmung der Basislinien zwischen den Stationen und der Quell-Positionen. Aus vielen solcher Messungen lassen sich somit ein TRF und CRF, sowie Transformations-Parameter zwischen den beiden Systemen (EOP) bestimmen. Weitere Details sind in [18] und [6] zu finden.

3. Satelliten-Tracking mit VLBI

Bei dieser speziellen Anwendung des VLBI-Verfahrens beobachten Radio-Antennen künstliche Satelliten-Signale, anstatt jener natürlicher Radioquellen, wie Quasare.

Ein Grundsatz bei der Entwicklung der Beobachtungs- und Datenanalyse-Prozesse für Satelliten war es, kompatibel mit Standard-Beobachtungen von Quasaren zu sein. Dadurch können Satelliten-Beobachtungen fließend in normale VLBI-Experimente integriert werden. Verwendung der Standard-Empfängertechnik und Berechnung von delays als primäre Beobachtungsgröße – analog zur Beobachtung von Quasaren – waren somit Voraussetzung (siehe Abb. 4).

Nichtsdestotrotz unterscheiden sich Satelliten- und Quasar-Beobachtungen, v.a. durch Geometrie und Signal-Charakteristika: Quasare befinden sich in Distanzen von Mrd. Lichtjahren, Satelliten im direkten Erdumfeld. Dies hat Auswirkungen auf die Steuerung der Antennen,

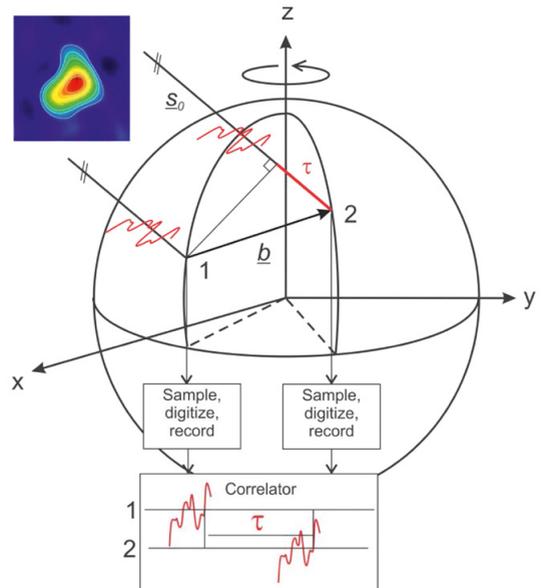


Abb. 3: Messprinzip der VLBI: Die primäre Beobachtungsgröße ist die Differenz der Ankunftszeiten des Signals eines Quasars an den Stationen 1 und 2. Dieser delay τ wird durch Kreuzkorrelation der digitalisierten Signale beider Stationen gewonnen und dient als Grundlage für die Schätzung geodätischer Parameter [18].

Berechnung der Sichtbarkeit eines Ziels in der Beobachtungsplanung und auf die Modellierung theoretischer delays in der Datenanalyse. Satelliten stellen dynamische Beobachtungsziele dar, die aktiv während der Signalaufzeichnung von den VLBI-Antennen getrackt werden müssen³⁾. Entsprechende Tracking-Mechanismen sind bei der Antennensteuerung zu implementieren. Im Gegensatz zu Quasar-Signalen sind jene von Satelliten meist moduliert, schmalbandig und weisen einen weit höheren Signalpegel auf. Dies muss beim Empfänger-Setup und in der Signal-Processierung beachtet werden.

All diese Rahmenbedingungen wurden bei der Prozess-Entwicklung berücksichtigt, wobei die Vienna VLBI and Satellite Software (VieVS [5]) eine Schlüssel-Komponente bildet. Sie wurde mit einem Modul zur Planung von Satelliten-Beobachtungen und zur Erstellung der Kontrolldateien für Antennen, Empfänger und Korrelation ausgestattet [10]. Auch die Datenanalyse-Funktionen wurden angepasst.

³⁾ Im Gegensatz zu GNSS Antennen müssen VLBI Antennen exakt auf das Ziel ausgerichtet werden.

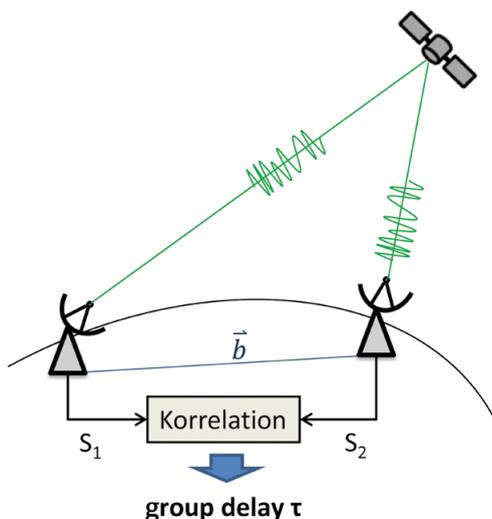


Abb. 4: Künstliche Satellitensignale werden mit der Standard-Empfängertechnik an den Stationen aufgezeichnet. Mittels Korrelation werden delays als primär Beobachtungsgröße berechnet – analog zur Beobachtung von Quasaren.

4. APOD Fallstudie

In einer Kooperation zwischen der TU Wien und der University of Tasmania wurde im November 2016 die einzige koordinierte Serie von VLBI Beobachtungen des chinesischen APOD Satellit durchgeführt. Die Ziele dieser Kampagne waren (1) die VLBI-Prozesskette für Beobachtung eines schnellen LEO-Satelliten mit einem regionalen Antennennetzwerk zu testen und (2) erstmals reale VLBI-Beobachtungsdaten für einen LEO Satelliten zu sammeln.

APOD wurde von den drei Antennen des australischen AuScope VLBI Netzwerks [13] zwischen dem 11. und 14. November 2016 beobachtet, sobald gemeinsame Sichtbarkeit von mindestens zwei Stationen aus gegeben war. Somit ergaben sich sieben Experimente mit einer Dauer von jeweils ca. 30 min (316a bis 319a, siehe Tabelle 1). Bei Experiment a332, beobachtet am 27. November 2016, handelt es sich um eine geodätische 24h Session mit insgesamt 761 Scans starker Quasare (mind. 0,65 Jansky), unterbrochen von vier APOD Scans.

4.1 Der APOD-A nano Satellit

Der APOD-A nano Satellit stellt einen ersten Prototyp eines Kollokations-Satelliten dar, der die Verfahren GNSS, SLR und VLBI auf einer gemeinsamen Plattform in der Erdumlaufbahn vereint.

Datum	Dauer	Code	Stationen
11.11.2016	33 min	316a	Ke, Yg
11.11.2016	41 min	317a	Ke, Hb
12.11.2016	35 min	317b	Ke, Yg, Hb
13.11.2016	26 min	318b	Ke, Yg, Hb
13.11.2016	26 min	318c	Ke, Hb
13.11.2016	23 min	318d	Ke, Yg
14.11.2016	40 min	319a	Ke, Yg, Hb
27.11.2016	24 h	a332	Ke, Yg, Hb

Tab. 1: APOD Experimente mit dem AuScope VLBI Netzwerk, beobachtet im November 2016. Neben dem Experiment-Code (Spalte 3) sind die beteiligten Stationen gelistet (Spalte 4).

APOD ist Teil einer chinesischen cube-satellite⁴⁾ Mission des Beijing Aerospace Control Center (BACC), gestartet im September 2015 [20]. Der Satellit befand sich während der Experimente im November 2016 auf einem polnahen (Inklination von ca. 97°) Low Earth Orbit (LEO) bei einer Höhe von nur ca. 450 km. Aufgrund der geringen Orbithöhe bewegt sich der Satellit extrem schnell mit einer Erdumlaufzeit von nur etwa 90 min.

Die geodätische Ausstattung des Satelliten umfasst einen GNSS Empfänger (für Beidou und GPS), einen SLR Retroreflektor und einen speziellen VLBI-Sender, der eine Serie schmalbandiger Signale (sog. DOR Signale) im S- und im X-Band aussendet. In beiden Frequenzbändern wird ein Trägersignal symmetrisch von vier schmalbandigen DOR-Signalen umgeben, wodurch sich eine Bandbreite von 10,3 MHz im S- und 38,3 MHz im X-Band ergibt. Da geodätische VLBI-Beobachtungen operationell im S- und im X-Band durchgeführt werden, sind an den Bodenstationen keine separaten Empfänger nötig, um das APOD Signal zu empfangen und aufzuzeichnen (im Gegensatz zur Beobachtung von GNSS Signalen im L-Band [16]).

Die Orbit-Bestimmung des BACC basierte auf den Daten des eingebauten GNSS-Empfängers. Leider versagte dieser teilweise im Januar 2016, wodurch die Genauigkeit der verfügbaren Orbitlösungen (post-processing) von anfänglich wenigen cm auf etwa 10 bis 20 m sank [20]. Prädizierte Orbitdaten, die vom BACC für das Tracking während der Beobachtungen zur Verfügung gestellt wurden, zeigten eine Unsicherheit von bis zu 1 km. Die großen Unsicherheiten in den Orbitda-

4) Unter *cube satellite* versteht man einen kleinen kubischen Satelliten. APOD-A nano ist nur etwa 40×40×40 cm groß und wiegt 26 kg.

ten verschlechterten die Tracking-Genauigkeit und die Qualität der modellierten delays in der Analyse (siehe Kapitel 4.5).

4.2 Das AuScope VLBI Netzwerk

Die drei AuScope VLBI Antennen sind identisch im Design, mit relativ kleinen 12 m Reflektoren und schnellen Drehraten von bis zu 5/sec im Azimuth- und 1,5/sec im Elevations-Kreis. Die Antennen sind mit modernen S- und X-Band Empfängern ausgestattet, die es erlauben sowohl Signale natürlicher Radioquellen, als auch jene des APOD Satelliten aufzuzeichnen. Ein spezieller Satelliten-Tracking Modus der Antennensteuereinheiten erlaubt es, Orbitdaten (dargestellt als Zeitserien lokaler Azimuth- und Elevations-Winkel) zu laden und damit die Trajektorie des Satellit während eines Überflugs kontinuierlich abzufahren. Dieser spezielle Tracking Modus und die schnellen Drehraten der Antennen sind essentielle Voraussetzungen um einen schnellen LEO Satelliten, wie APOD, erfolgreich zu beobachten.

4.3 Scheduling und Beobachtungen

Der erste Schritt eines jeden VLBI Experiments ist die Beobachtungsplanung – auch *Scheduling* genannt. Im Scheduling wird definiert, welche Radioquellen mit welchen Antennen zu bestimmten Zeiten simultan beobachtet werden. Neben dem zeitlichen Ablauf eines Experiments werden alle Parameter für die Signalaufzeichnung (u. a. Frequenzbänder und Samplingrate), entsprechend dem vorhandenen Stations-Equipment, definiert. Zur Planung der Satelliten-Beobachtungen wurde eine speziellen Scheduling-Software verwendet, die als Modul in VieVS implementiert wurde [10]. Die Satelliten-Beobachtungen wurden mit einer speziellen Scheduling-Software geplant, die als Modul in VieVS implementiert ist [10]. Das Ergebnis sind Schedule-Dateien, die ein Experiment vollständig beschreiben und Tracking-Dateien mit Orbit-Parametern. Basierend auf diesen Dateien können die beteiligten Stationen das Experiment semi-automatisch durchführen.

Das Design der Experimente war weitgehend bestimmt durch Kontinent-weite Basislinien (2360 bis 3432 km Länge, siehe Abb. 5) und den sehr niedrigen Orbit von APOD (ca. 450 km). Diese Beobachtungsgeometrie schränkte die gemeinsame Sichtbarkeit des Satelliten von den Stationen aus signifikant ein und ermöglichte lediglich Scans mit max. zwei Stationen bei ein bis drei Überflügen pro Tag. Abb. 5 zeigt die Situation exemplarisch

für zwei aufeinander folgende Scans (168 und 169) in Experiment a332. APOD überflog Australien von Süd nach Nord und wurde zuerst für ca. 1,5 min auf der Basislinie Hb-Yg beobachtet (Scan 168), gefolgt von Scan 169 auf der Basislinie Yg-Ke (ca. 5 min Dauer). Diese beiden Scans sind repräsentativ für alle APOD-Beobachtungen und dienen als generisches Beispiel für die Datenanalyse in Kap. 4.5.

APOD überflog den Sichtbarkeitsbereich einer Bodenstation in weniger als 10 min. Durch diese Dynamik ergaben sich, vor allem beim Tracking nahe dem Zenit, extrem hohe Anforderungen an die Antennensteuerung. Diese arbeitete im Satelliten-Tracking Modus (siehe Kap. 4.2) und gewährleistete, dass APOD während der Signalaufzeichnung im schmalen Blickfeld⁵⁾ der Antenne blieb. Andernfalls würde man das Signal verlieren und die aufgezeichneten Daten wären unbrauchbar.

Bei erfolgreichem Tracking wurden die APOD-Signale in den Empfängern der jeweiligen Stationen digitalisiert, gespeichert und anschließend per Internet an das Korrelationszentrum in Wien zur weiteren Verarbeitung gesandt.

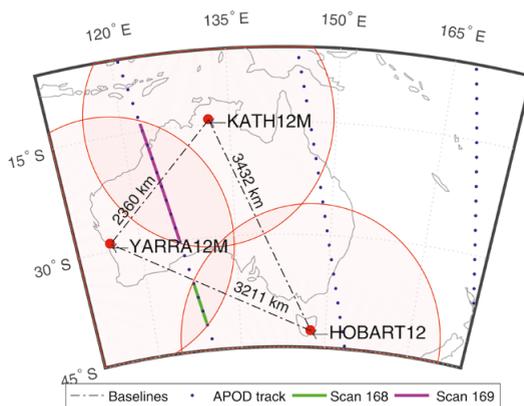


Abb. 5: Beobachtungsgeometrie in Experiment a332. Projiziert dargestellt sind die Sichtbarkeitsbereiche der Antennen (rote Kreise), sowie die Bahn von APOD (punktierete Linie) [11].

4.4 Korrelation

Im Korrelations-Prozess werden die digitalen Datenströme, die an den beteiligten Stationen eines Scans aufgezeichnet wurden, paarweise miteinander kombiniert, um mittels Kreuzkorrelation Beobachtungsgrößen in Form von *group delays* τ zu bestimmen. Diese delays τ entsprechen der Differenz der Ankunftszeiten der Signale an den

5) 38,1' im S- und 10,2' im X-Band.

Stationen und bilden die Grundlage für die nachfolgende Analyse und Schätzung geodätischer Zielparameter.

Für dieses Projekt wurde Supercomputer *Vienna Scientific Clusters (VSC)*⁶⁾ genutzt, um die große Menge an Rohdaten schnell zu bearbeiten. Die Daten wurde mit der Software DiFX [7] korreliert und mit dem Haystack Observatory Post-processing System (HOPS)⁷⁾ wurden die delays bestimmt. Ergebnis sind Zeitserien von group delays τ in einem 1 sec Intervall für alle APOD Scans, separat für das S- und X-Band.

Im Korrelations-Prozess konnte das Amplitudenspektrum des aufgezeichneten Signals rekonstruiert werden. Abb. 6 zeigt das Amplitudenspektrum des APOD Signals, aufgezeichnet an der Station YARRA12M (Yg) in Scan 168 des Experiments a332. Die Amplitude ist in beiden Frequenzbändern über die Zeit gesehen konstant. Daraus lässt sich schließen, dass das Tracking trotz der ungenauen Orbitdaten (siehe Kap. 4.1) ausreichend genau war. Mangelhaftes Tracking würde sich in schwankenden Signalamplituden, bis hin zum Verlust des Signals, äußern.

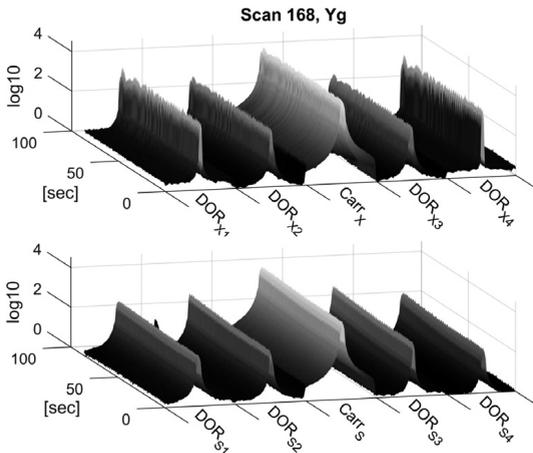


Abb. 6: Amplitudenspektrum des APOD Signals im X- (oben) und S-Band (unten), aufgezeichnet in Scan 168 in Experiment a332. Die Amplituden der DOR-Signale ($DOR_{S_i|X_i}$) und der Trägersignale ($Carr_{S|X}$) sind gegen die Zeit dargestellt.

4.5 Analyse der Beobachtungen

Um den dispersiven Einfluss der Ionosphäre zu korrigieren, wurde die Ionosphären-freie Linearkombination aus den S- und X-Band delays

berechnet [1]. Diese reduzierten Beobachtungen (τ_{obs}) wurden mit VieVS analysiert.

Im ersten Schritt wurden die Differenzen zwischen den beobachteten delays (τ_{obs}) und modellierten delays (τ_{comp}) gebildet – sogenannte *observed minus computed (OMC)* Residuen. Sie sind ein Maß dafür, wie gut die Beobachtungen den verwendeten Modellen entsprechen und werden als Eingangsgröße für die nachfolgende Parameterschätzung benötigt. Die τ_{comp} wurden mit einem speziellen VLBI delay Modell für Erdnahe Beobachtungsziele [12] berechnet, unter Verwendung der finalen Orbitlösung des BACC (siehe Kap. 4.1) und der geophysikalischen Standardmodelle in VieVS. Typischerweise liegen die OMC-Residuen der APOD-Beobachtungen in einem Bereich von ca. 10 ns. Abb. 7 zeigt exemplarisch die OMC-Residuen der beiden in Abb. 5 dargestellten Scans. Untersuchungen zeigten, dass die systematische Signatur (Krümmung in Scan 169) durch einen along-track Offset von ca. 8 m in den, für die delay-Modellierung verwendeten, Orbitdaten erklärt werden kann. Beachtet man die geringe Genauigkeit der Orbitdaten (siehe Kap. 4.1), so entsprechen die OMC-Residuen den Erwartungen. Schlussfolgerung ist, dass es mit den zur Verfügung stehenden Orbitdaten unumgänglich ist, Orbit-Parameter zu schätzen. Ansonsten propagieren die nicht berücksichtigten Orbitfehler zu anderen Zielparametern und verschlechtern deren Bestimmung.

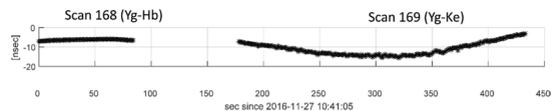


Abb. 7: Observed minus computed (OMC) Residuen der Scans 168 und 169 in Experiment a332

Basierend auf den in Abb. 7 gezeigten OMC-Residuen wurden mit VieVS in einem Kleinste-Quadrate-Ausgleich konstante Stationsuhren-Offsets (relativ zur Uhr in Yg), Zenith Wet Delays (ZWD) je Station und Offsets zum a priori Satellitenorbit (in 3 Richtungen) geschätzt. Tab. 2 listet die Ergebnisse und Abb. 8 zeigt die post-fit Residuen mit einem gewichteten quadratischen Mittelwert (WRMS) von 9,5 cm. Beachtet man die Umstände (schwache Beobachtungsgeometrie, wenige bzw. stark korrelierte Beobachtungen) so entsprechen die Resultate dieses Fallbeispiels den Erwartungen. Insbesondere der zuvor vermutete Orbit-Offset von ca. 8 m in along-track Richtung bestätigte sich mit einem Schätzwert von 7,8 m.

6) <https://vsc.ac.at>

7) <https://www.haystack.mit.edu/tech/vlbi/hops.html>

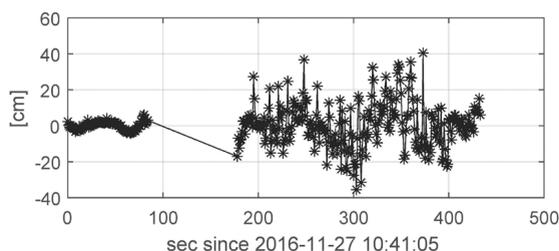


Abb. 8: Post-fit Residuen der Scans 168 und 169 in Experiment a332 (WRMS = 9,5 cm)

Parameter	Schätzwert	Std.Abw.
Clock offset, Hb	14,0 m	2,3 m
Clock offset, Ke	-1,1 m	1,9 m
ZWD, Hb	3,4 cm	1,7 cm
ZWD, Ke	14,3 cm	2,1 cm
ZWD, Yg	7,3 cm	1,7 cm
Orbit, radial	1,2 m	0,3 m
Orbit, along-track	-7,8 m	0,3 m
Orbit, cross-track	-1,9 m	1,3 m

Tab. 2: Geschätzte Parameter der Scans 168 und 169 in Experiment a332

5. Zusammenfassung

Satelliten-Tracking mit VLBI ist Gegenstand aktueller Forschung und bietet vielversprechende Möglichkeiten zur Verknüpfung geodätischer Weltraum-Verfahren mittels Kollokation im Weltraum. Solche Beobachtungen haben das Potential, globale geodätische Referenzrahmen, wie den ITRF, weiter zu verbessern.

In einer Kooperation der TU Wien und der University of Tasmania wurde erstmals eine komplette Prozesskette zur Planung, Durchführung, Korrelation und Analyse von Satelliten-Beobachtungen mit VLBI erstellt. Basierend darauf wurden mehrere Experiment-Serien, mit Beobachtungen von GNSS-Satelliten [16] und des chinesischen APOD-Satelliten [11], erfolgreich durchgeführt.

APOD stellt einen Prototyp eines Kollokations-Satelliten dar und ist, neben GNSS- und SLR-Equipment, mit einem speziellen Sender ausgestattet, der geodätische VLBI Beobachtungen im S- und X-Band ermöglicht. 2016 wurde der Satellit über mehrere Tage hinweg vom australischen AuScope VLBI Netzwerk getrackt. Große Herausforderungen waren hierbei der niedrige Orbit und die daraus folgende hohe Geschwindigkeit des Satelliten, sowie ungenaue Orbit-Parameter infolge einer Fehlfunktion des GNSS-Empfängers an Board. Nichtsdestotrotz konnten durch Kor-

relation am VSC Beobachtungsdaten (delays τ) bestimmt und mit VieVS analysiert werden. Es wurde gezeigt, dass es möglich ist, mit einem regionalen VLBI-Netzwerk einen LEO Satellit erfolgreich zu tracken und basierend auf den Beobachtungsdaten geodätische Zielparameter zu schätzen. Obwohl die Qualität der Daten derzeit nicht ausreicht, um sie sinnvoll für die Verknüpfung geodätischer Verfahren zu nutzen, bildet diese Studie eine wichtige Grundlage für zukünftige Experimente und Entwicklungen.

Danksagung

Diese Studie wurde vom österreichischen Wissenschaftsfond (FWF Projekte I2204 und J3699-N29) und National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11603001) unterstützt. Ich danke dem AuScope VLBI Projekt und dem Vienna Scientific Cluster (VSC-3) für die Bereitstellung ihrer Infrastruktur.

Literatur

- [1] Alizadeh, M. M., Wijaya, D. D., Hobiger, T., Weber, R. und Schuh, H. (2013): Ionospheric Effects on Microwave Signals. In Böhm, J. und Schuh, H., Hg., Atmospheric Effects in Space Geodesy, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 35–71.
- [2] Altamimi, Z., Collilieux, X. und Métivier, L. (2011): ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 85(8), 457–473.
- [3] Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L. und Collilieux, X. (2016): ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), 6109–6131.
- [4] Anderson, M. J., Beyerle, G., Glaser, S., Liu, L., Männel, B., Nilsson, T., Heinkelmann, R. und Schuh, H. (2018): Simulations of VLBI observations of a geodetic satellite providing co-location in space. *Journal of Geodesy*, 92(9), 1023–1046. URL <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1115-5>.
- [5] Böhm, J., Böhm, S., Boisits, J., Girdiuk, A., Gruber, J., Hellerschmied, A., Krásná, H., Landskron, D., Madzak, M., Mayer, D., McCallum, J., McCallum, L., Scharfner, M. und Teke, K. (2018): Vienna VLBI and Satellite Software (VieVS) for Geodesy and Astrometry. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130(986).
- [6] Böhm, J., Böhm, S., Gruber, J., Hellerschmied, A., Krásná, H., Landskron, D., Mayer, D. und Scharfner, M. (2019): Very Long Baseline Interferometry for Global Geodetic Reference Frames. *VGI - Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 107(2/2019), 70–73.
- [7] Deller, A. T., Brisken, W. F., Phillips, C. J., Morgan, J., Alef, W., Cappallo, R., Middelberg, E., Romney, J., Rottmann, H., Tingay, S. J. und Wayth, R. (2011): DiFX-2: A More Flexible, Efficient, Robust, and Powerful Software Correlator. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 123(901), 275. URL <http://stacks.iop.org/1538-3873/123/i=901/a=275>.

- [8] Haas, R., Neidhardt, A., Kodet, J., Plötz, C., Schreiber, U., Kronschnabl, G., Pogrebenko, S., Duev, D., Casey, S., Marti-Vidal, I., Yang, J. und Plank, L. (2014): The Wettzell-Onsala G130128 experiment – VLBI-observations of a GLONASS satellite. In Behrend, D., Baver, K. und Armstrong, K., Hg., *IVS 2014 General Meeting Proceedings - VGOS: The New VLBI Network*. Science Press, 451–455.
- [9] Hellerschmied, A. (2018): Satellite Observations with VLBI. Nr. 102 in *Geowissenschaftliche Mitteilungen*. Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien, Vienna, Austria.
- [10] Hellerschmied, A., Böhm, J., Neidhardt, A., Kodet, J., Haas, R. und Plank, L. (2017): Scheduling VLBI Observations to Satellites with VieVS. In van Dam, T., Hg., *REFAG 2014: Proceedings of the IAG Commission 1 Symposium Kirchberg, Luxembourg, 13–17 October, 2014*. Springer International Publishing, 59–64.
- [11] Hellerschmied, A., McCallum, L., McCallum, J., Sun, J., Böhm, J. und Cao, J. (2018): Observing APOD with the AuScope VLBI Array. *Sensors*, 18(5). URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/5/1587>.
- [12] Klioner, S. (1991): General Relativistic Model of VLBI Observables. In Alef, W., Bernhart, S. und Nothnagel, A., Hg., *Proceedings of the AGU Chapman Conference on Geodetic VLBI: Monitoring Global Change*, Washington D. C., April 22–26, 1991. NOAA Technical Report NOS 137 NGS 49, 188–202.
- [13] Lovell, J. E. J., McCallum, J. N., Reid, P. B., McCulloch, P. M., Baynes, B. E., Dickey, J. M., Shabala, S. S., Watson, C. S., Titov, O., Ruddick, R., Twilley, R., Reynolds, C., Tingay, S. J., Shield, P., Adada, R., Ellingsen, S. P., Morgan, J. S. und Bignall, H. E. (2013): The AuScope geodetic VLBI array. *Journal of Geodesy*, 87(6), 527–538.
- [14] Plag, H. P. und Pearlman, M., Hg. (2009): *Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [15] Plank, L., Böhm, J. und Schuh, H. (2014): Precise station positions from VLBI observations to satellites: a simulation study. *Journal of Geodesy*, 88(7), 659–673.
- [16] Plank, L., Hellerschmied, A., McCallum, J., Böhm, J. und Lovell, J. (2017): VLBI observations of GNSS-satellites: from scheduling to analysis. *Journal of Geodesy*, 91(7), 867–880. URL <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0992-8>.
- [17] Rothacher, M., Beutler, G., Behrend, D., Donnellan, A., Hinderer, J., Ma, C., Noll, C., Oberst, J., Pearlman, M., Plag, H.-P., Richter, B., Schöne, T., Tavernier, G. und Woodworth, P. L. (2009): The future Global Geodetic Observing System. In Plag, H.-P. und Pearlman, M., Hg., *Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020*, Springer Berlin Heidelberg. 237–272.
- [18] Schuh, H. und Böhm, J. (2013): *Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 339–376. URL [https://doi.org/10.1007/978-3-642-28000-9/s\do4\(7\)](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28000-9/s\do4(7)).
- [19] Seitz, M., Angermann, D., Bloßfeld, M., Drewes, H. und Gerstl, M. (2012): The 2008 DGF1 realization of the ITRS: DTRF2008. *Journal of Geodesy*, 86(12), 1097–1123.
- [20] Sun, J., Tang, G., Shu, F., Li, X., Liu, S., Cao, J., Hellerschmied, A., Böhm, J., McCallum, L., McCallum, J., Lovell, J., Haas, R., Neidhardt, A., Lu, W., Han, S., Ren, T., Chen, L., Wang, M. und Ping, J. (2018): VLBI observations to the APOD satellite. *Advances in Space Research*, 61(3), 823–829.
- [21] Thaller, D. (2008): *Inter-technique combination based on homogenous normal equation systems including station coordinates, earth orientation and troposphere parameters*. Dissertation, Deutsches GeoForschungs-Zentrum, Potsdam, Germany. Scientific technical report STR08/15.
- [22] Tornatore, V., Haas, R., Casey, S., Pogrebenko, S. und Molera Calvés, G. (2014): Direct VLBI Observations of Global Navigation Satellite System Signals. In Rizos, C. und Willis, P., Hg., *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet*, Proc. IAG General Assembly, 2011. Springer Berlin Heidelberg, Bd. 6 von *International Association of Geodesy Symposia*, 247–252.

Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Dr. Andreas Hellerschmied, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Abteilung Grundlagen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien.

E-Mail: andreas.hellerschmied@bev.gv.at